

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Лакиза Владислав Андреевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ИЗНОСА  
ОПРАВОК ПРИ ПРОШИВКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ТИТАНОВЫХ  
СПЛАВОВ НА ДВУХВАЛКОВЫХ СТАНАХ

Специальность  
2.6.4 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
Д.т.н., профессор Романцев Б.А.

Москва – 2024

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Бесшовные трубы широко применяются в нефтегазовой, машиностроительной и многих других отраслях промышленности. Контроль качества труб осуществляется на соответствие комплексу механических свойств, состояния поверхности и геометрическим параметрам трубы. Качество поверхности труб во многом определяется калибровкой и состоянием рабочего инструмента, в частности при производстве бесшовных труб на станах винтовой прокатки в первую очередь необходимо контролировать форму и поверхность оправок, так как от этого зависят геометрические параметры и качество внутренней поверхности труб, стабильность процесса прошивки. Износ оправок приводит к увеличению материальных затрат и снижению эффективности работы оборудования.

На трубопрокатных станах в России и за рубежом используют оправки диаметром от 19 до 500 мм, изготовленные из легированных сталей и сплавов по различным технологиям: обработкой резанием из литой и деформированной заготовки, заковкой труб, с внутренней полостью для охлаждения и выходом воды и пара при прошивке. Переход в последнее время большинства предприятий к использованию непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) диктует необходимость применения оправок без отверстий для выхода воды и пара для уменьшения вероятности образования внутренних плен на гильзах и трубах. Однако такое техническое решение резко ужесточило условия эксплуатации прошивных оправок и вызвало снижение их износостойкости, особенно при прокатке труб из легированных сталей и сплавов. В связи с этим ученые и производственники решают задачи по исследованию и выбору материалов для оправок, совершенствованию технологии их изготовления, применению различных покрытий и наплавов. При этом в производственных условиях установлено, что калибровка оправок не является определяющей износостойкостью и наиболее приемлемой является калибровка оправок со сферической рабочей частью.

Для более глубокого исследования износостойкости оправок при прошивке труб из легированной стали и сплавов необходимо учитывать не только материалы, из которых изготовлены сами оправки, но и условия их эксплуатации. Важно также анализировать влияние параметров процесса на износ оправок и определять рациональные режимы работы станов винтовой прокатки. В связи с этим теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку рекомендаций по повышению износостойкости оправок при прошивке заготовок из легированной стали и сплавов являются актуальными и способствуют сокращению простоев оборудования, повышению качества поверхности получаемых труб и снижению затрат на закупку нового инструмента.

**Цель работы.** Исследование износостойкости оправок при прошивке заготовок из

легированных сталей и титановых сплавов на стане винтовой прокатки.

Для достижения цели необходимо выполнить поставленные задачи:

- проанализировать факторы, влияющие на устойчивость рабочего инструмента к износу при прошивке заготовок из легированной стали и титановых сплавов на двухвалковом стане винтовой прокатки;
- исследовать износостойкость оправок, изготовленных из различных материалов, при прошивке заготовок из легированной стали и титановых сплавов на стане МИСИС-130Д и трубопрокатном агрегате ТПА 70-270;
- установить влияние технологических параметров на износостойкость прошивных оправок на станах винтовой прокатки с помощью моделирования в программном комплексе QForm 3D;
- разработать методику оценки износа и повышения износостойкости прошивных оправок;
- разработать режимы получения титановых труб на двухвалковых станах винтовой прокатки МИСИС-130Д и ТПА 70-270 и провести анализ износа прошивных оправок при получении данных труб.

#### **Научная новизна работы:**

- установлен характер влияния частоты вращения валков, коэффициента овализации и угла подачи рабочих валков на износ оправки при прошивке заготовок из легированной стали и титановых сплавов на стане МИСИС-130Д;
- для исследуемого класса сталей рассчитана величина углеродного эквивалента и определено его влияние на износостойкость оправок при прошивке заготовок;
- определены рациональные параметры очага деформации, обеспечивающие повышение износостойкости оправок при прошивке труб из легированной стали и титановых сплавов с помощью моделирования в программном комплексе QForm 3D и подтвержденные физическим экспериментом;
- разработана методика оценки величины износа прошивных оправок, базирующаяся на компьютерном моделировании с учетом данных физического эксперимента;
- исследована износостойкость рабочего инструмента при получении труб из стали 20Х13 и титановых сплавов на станах МИСИС-130Д и ТПА 70-270.

#### **Практическая значимость работы** заключается в:

- анализе влияния угла подачи рабочих валков, коэффициента овализации и частоты вращения рабочих валков на износ оправки при прошивке заготовок из легированной стали и титановых сплавов;

- составлении рекомендаций по выбору материала оправок, применяемых при производстве гильз и труб из легированных сталей, учитывая данные, полученные в ходе экспериментальных прокаток на двухвалковых станах винтовой прокатки, и определение осевого усилия металла на оправку в процессе прошивки заготовок в зависимости от угла подачи рабочих валков и диаметра оправки;

- разработке рациональных режимов прокатки, направленных на сокращение машинного времени прошивки, благодаря повышению частоты вращения рабочих валков и увеличению угла подачи;

- разработке методики прогнозирования износа прошивных оправок

- разработке технологии получения труб из легированной стали и титановых сплавов на двухвалковых станах МИСИС-130Д и ТПА 70-270.

**Методы исследования.** Для изучения процесса изнашивания прошивных оправок во время прокатки заготовок из легированной стали и титановых сплавов на стане винтовой прокатки проведена комплексная работа, включающая моделирование процессов в программном комплексе QForm 3D и проведение экспериментальных исследований на станах ТПА 70–270 и МИСИС–130Д. Построение моделей инструментов и очагов деформаций осуществлялось с применением программных комплексов SolidWorks и КОМПАС-3D. В ходе экспериментальных прокаток использовалось современное измерительное оборудование с целью фиксации усилий металла на оправку, а также измерения размеров и массы прошивных оправок.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена использованием передовых технологий и оборудования, а также применением разнообразных исследовательских методов — как экспериментальных, так и теоретических. Обработка данных с помощью вычислительной техники позволила получить точные результаты, которые затем были успешно проверены в промышленных условиях.

**Положения, выносимые на защиту:**

- закономерности влияния основных технологических параметров на износ оправок при прошивке заготовок из титановых сплавов и легированной стали;

- закономерность влияния усилия металла на оправку при изменении угла подачи и диаметра оправки;

- особенности влияния материалов прошивных оправок на их износостойкость при прошивке заготовок из легированной стали;

- разработка рекомендаций по выбору параметров очага деформации и материала прошивной оправки с целью повышения износостойкости оправки.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы представлены на Международной научно-практической конференции «Трубы-2023» (г. Челябинск, 2023).

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Диссертация по своей тематике целям, задачам, научной новизне теоретической и практической значимости, методологии и методам исследования, положениям, выносимым на защиту, соответствует паспорту специальности 2.6.4 – Обработка металлов давлением по п.1, 2, 7.

**Публикация.** Основные положения диссертационной работы были представлены в трёх научных статьях, которые опубликованы в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ. Две из них входят в журналы, включенные в базу данных Scopus. Все опубликованные статьи входят в базу данных РИНЦ. По результатам работы получено свидетельств о государственной регистрации ноу-хау.

**Объём и структура работы.** Диссертационная работа, состоящая из введения, пяти глав, выводов и списка использованных источников, включающего 78 наименований отечественных и зарубежных авторов, имеет общий объём 112 страницы машинописного текста с 37 таблицами и 70 рисунками.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследования, сформулирована цель работы и задачи, необходимые для ее достижения, описывается практическая значимость и научная новизна исследования, отражается общая структура работы.

**В первой главе** представлен подробный анализ научных и технических источников, который позволил сделать вывод о том, что в настоящее время проводятся исследования, направленные на создание и улучшение методов производства бесшовных труб из легированной стали и титановых сплавов с применением станов винтовой прокатки. Технология горячей прокатки обеспечивает высокое качество продукции с заданной точностью геометрических размеров и представляет возможность быстрого перехода на производство различных типоразмеров труб.

Исследования показали, что износ оправок при прошивке заготовок из легированной стали и титановых сплавов играет ключевую роль в промышленном производстве, так как качество получаемых гильз и труб, производительность стана и стоимость продукции во многом зависят от стойкости прошивных оправок.

Прошивные оправки, используемые при получении труб из легированной стали и титановых сплавов в станах винтовой прокатки, подвергаются продолжительным и интенсивным термическим напряжениям и воздействию высоких давлений в процессе эксплуатации, что предопределяет их интенсивный износ, поэтому важно выбрать соответствующий материал и технологические параметры эксплуатации для обеспечения стабильной прошивки, а также для прогнозирования износа оправок. Ресурс оправок, в зависимости от прошиваемого металла, отличается на несколько порядков. По мнению ряда авторов, для прошивного стана рекомендуется иметь отдельные наборы оправок, адаптированные для работы с различными марками легированной стали и титановых сплавов. Вместе с тем конкретные рекомендации по комплектованию наборов оправок применительно к условиям производства и сортаменту труб не приведены.

В процессе прошивки особенно важно учитывать интенсивность деформации в различных частях оправки и жаростойкость ее материала. Для улучшения свойств и продления срока службы оправок используются различные методы, такие как нанесение технологической смазки, усовершенствованная калибровка, а также обработка поверхности и выбор материала с учетом химического состава металла и адгезии с деформируемым металлом. Формирование окисной пленки на поверхности оправки и применение

специальных материалов для наплавки участков поверхности также способствуют увеличению износостойкости оправок. Распределение и величина износа оправок зависят от их длины и формы рабочего участка. Оправки с более длинной рабочей частью изнашиваются более равномерно. Сферическая форма оправки наиболее практична для изготовления труб в трубопрокатном производстве, а протяженность сферической части и угол наклона касательной к ней, также как и общая длина оправок играют важную роль в качестве получаемых гильз. Однако конкретные рекомендации по определению соотношения размеров оправок и их влияние на величину износа отсутствуют.

Анализ научно-технической литературы позволяет сделать вывод о необходимости проведения, дополнительного исследования проблемы износостойкости оправок в процессе прошивки гильз, чтобы выбрать рациональные режимы и материалы для повышения их износостойкости.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния материала прошивной оправки на ее износостойкость при прошивке заготовок диаметром 60 мм из коррозионностойкой стали 20X13 на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д.

Практика трубопрокатного производства показывает, что при прокатке труб из углеродистых и низколегированных сталей используют в основном, для изготовления оправок, конструкционные стали марок 20X2Н4А, 20ХН3А, 20ХН4ФА и другие, которые имеют достаточно высокую износостойкость от 500 до 1000 проходов. Однако при прошивке легированных и высоколегированных сталей износостойкость оправок резко снижается до нескольких проходов, что обусловлено ужесточением температурных и силовых нагрузок. Например, осевое усилие металла на оправку при прошивке заготовок из нержавеющей стали 12Х18Н10Т по сравнению с заготовками из стали 45 выше в 1,8 раза, возрастает скольжение металла относительно инструмента возрастает и увеличивается машинное время прошивки. В связи с этим требуется материал оправок, выдерживающий такие условия эксплуатации, но при этом стоимость инструмента должна быть экономически оправданной и приемлемой для массового производства. Этим требованиям может соответствовать ряд марок сталей для изготовления штампов горячего деформирования: хромовольфрамованадиевые 4ХСМФ, 4Х5МФС, 4Х5МФ1С, 3Х3М3Ф, и хромовольфрамомолибденованадиевые 4Х3ВМФ, 4Х4МВФС, 4Х2СВ2МФ и 5Х3В3МФС.

В последние годы на большинстве трубопрокатных агрегатов значительную долю сортамента занимают коррозионностойкие трубы из стали 20X13. Многие проблемы освоения технологии прокатки из НЛЗ обусловлены низкой износостойкостью прошивных оправок, традиционно изготавливаемых из сталей марок 20ХН4ФА, 20Х2Н4А, 20ХН3А без выхода воды

и пара из внутренней полости оправки во время прошивки.

Для исследования износостойкости прошивных оправок были выбраны шесть марок жаропрочных сталей, применяемые для изготовления штампов горячего деформирования, эксплуатируемых в близких температурно-деформационных условиях: 4Х5МФС, 3Х2В8Ф, 3Х3М3Ф, 4Х4ВМФС, 5Х3В3МФС и для сравнения традиционная марка 20Х2Н4А. Данные марки стали, имеющие различный химический состав и свойства, были ранжированы по углеродному эквиваленту (таблица 1). В таблице также указана условная стоимость этих сталей относительно стали 20Х2Н4А.

Калибровка оправок без внутреннего охлаждения представлена на рисунке 1.

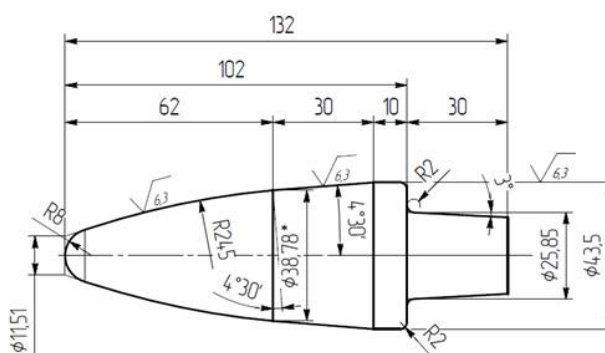


Рисунок 1 – Оправка прошивного стана МИСиС-130Д

Оправки были изготовлены обработкой резанием из горячекатаного проката, а затем по традиционной технологии выдержаны в камерной электрической нагревательной печи в течение 60 минут при температуре 930 °С, с целью формирования на их рабочей поверхности оксидного слоя толщиной 0,1 – 0,15 мм.

Для определения износостойкости назначили режимы прошивки, обеспечивающие наиболее длительное машинное время прошивки. Заготовки, диаметром 60 мм, изготовленные из стали 20Х13, прошивали при угле подачи 10°, коэффициенте вытяжки  $\mu=2,2$  и частоте вращения валков 30 об/мин. Время прошивки составило около 13 секунд. Оправка, изготовленная из стали марки 20Х2Н4А, деформировалась и неравномерно изнашивалась после первого прохода и была признана, по экспертной оценке, непригодной для дальнейшего использования, а на других оправках наблюдали оплавление и деформацию носка различной степени. Длина оправок из-за износа постепенно уменьшалась, при этом наибольшие изменения формы были отмечены у оправок из сталей 3Х3М3Ф и 3Х2В8Ф. В процессе эксплуатации на сферической рабочей поверхности оправок образовались следы износа в форме рисок глубиной от 0,5 мм до 0,7 мм, что затрудняло дальнейшее использование данных



оправок. Износ оправок оценивали на основе изменения их массы в процессе прошивки одной заготовки, средняя масса оправок составляла 860 г.

Согласно результатам испытаний, износостойкость оправок из стали 4Х5МФС гораздо выше, чем у оправок, изготовленных из других материалов, что, по-видимому, связано с разницей в значении углеродного эквивалента ( $C_{\Sigma}$ ) материала оправок (таблица 1). Об этом свидетельствует потеря массы оправок, минимальное значение которой, равное 23 г наблюдается после прокатки заготовок наблюдается у оправки из стали 4Х5МФС, потери в пределах 30 - 40 г характерны для других рассматриваемых материалов.

Показатель углеродного эквивалента отражает свариваемость стали и в какой-то мере может служить оценкой адгезии этой стали к металлу прошиваемой заготовки. Исследование показало, что с ростом углеродного эквивалента в среднем потеря массы во время прошивки становится меньше.

Таблица 1 – Химический состав легированных сталей

№	Сталь	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Ni	V	$C_{\Sigma}$	Условная стоимость 1 тонны
1	4Х5МФС	0,32- 0,40	0,8- 1,2	0,15- 0,4	4,5- 5,5	1,2- 1,5	-	-	0,3- 0,5	1,54	1,94
2	4Х4ВМФС	0,37- 0,41	0,6- 1,0	0,2- 0,5	3,2- 4,0	1,2- 1,5	0,8- 1,2	-	0,6- 0,9	1,32	1,99
3	5Х3В3МФС	0,45- 0,52	0,5- 0,8	0,3- 0,6	2,5- 3,2	0,8- 1,0	3,0- 3,6	-	1,5- 1,8	1,31	2,5
4	3Х3М3Ф	0,27- 0,31	0,2- 0,40	0,3- 0,5	2,8- 3,5	2,5- 3,0	-	-	0,4- 0,6	1,09	2,22
5	3Х2В8Ф	0,3- 0,4	0,15- 0,40	0,15- 0,40	2,2- 2,7	-	7,5- 9,0	-	0,2- 0,5	0,95	3,05
6	20Х2Н4А	0,16- 0,22	-	0,3- 0,6	1,25- 1,65	-	-	3,26- 3,65	-	0,69	1,0

Результаты визуального осмотра оправок после процесса прошивки и анализ данных об изменении их массы позволяют предположить, что основная причина их износа — адгезионное взаимодействие между оправкой и металлом. Для уменьшения вероятности износа оправок стоит отдавать предпочтение материалам, обладающим минимальной

склонностью к адгезии с материалом заготовки.

В ходе эксперимента выявлено, что после трех прошивок все оправки из-за износа по экспертным оценкам стали непригодны для использования, что свидетельствует о критическом значении выбранного машинного времени, 13 секунд, для данных оправок.

С целью снижения машинного времени процесса прошивки длину заготовок уменьшили в два раза. Это позволило сократить время процесса до 7,5 секунд и увеличить количество прошивок до 6. Между прошивками поверхность оправки контролировали также на наличие и характер налипания частиц металла заготовки.

Начальная стадия износа оправок напрямую зависит от химического состава материала и его механических свойств. Эксперимент показал, что оправки из стали 4X5МФС обладают наибольшей стойкостью несмотря на то, что следы износа на ней были замечены после второй прошивки, развития износа при последующих прошивках не наблюдалось. Для оправок из материалов 20X2Н4А, 3X2В8Ф и 5X3В3МФС характерно зарождение на их поверхности незначительного количества дефектов после трех прошивок. Однако появление данных дефектов не вызывает проблем с эксплуатационными свойствами, последующие операции прошивки увеличивают общий объем износа материала. У оправки из стали 4X4ВМФС первые следы дефектов поверхности появились только после четвертой прокатки, при этом скорость их развития была самой низкой.

В процессе проведения эксперимента было выявлено, что чем выше углеродный эквивалент материала оправки, тем меньше потеря массы в процессе прошивки. Среди рассматриваемых материалов оправок сталь 4X5МФС обладает наивысшим  $C_3$ , что способствует минимизации потери массы, при этом сокращение массы за одну операцию прошивки составляет менее 5 г. Хотя поверхностные дефекты на оправке из данного материала появились раньше, чем у других оправок, но по мере увеличения числа прошивок не наблюдалось резкого развития дефектов и ухудшения состояния поверхности. Углеродный эквивалент материала оправки 4X4ВМФС (таблица 1) ниже, чем у 4X5МФС, что способствует, по-видимому, увеличению потери массы до 9 г после шести прошивок. Повышенное количество поверхностных дефектов и более низкий углеродный эквивалент оправки из стали 3X3М3Ф привели к увеличению потери массы в процессе прошивки до 12 г.

По данным о потере массы оправки рассчитывали материалостойкость оправок из разных марок стали по формуле:

$$q_{\text{опр}} = \frac{G}{\Delta M}, \text{ кг/г, где} \quad (2)$$

где  $G$  – масса заготовки, кг;  $\Delta M$  – изменение массы оправки, г.

Анализ результатов показал, что высокое качество поверхности оправки характерно для материала 4X4BMФC, однако показатель материалостойкости значительно выше у оправки из стали 4X5MФC.

В ходе проведения третьего эксперимента время прошивки было сокращено до 6 секунд благодаря увеличению угла подачи до  $14^\circ$ . После пяти прошивок на всех оправках, за исключением изготовленной из стали 20X2H4A, значительные поверхностные дефекты не были выявлены. Деформация носка и образование рисок наблюдалось у оправок из стали 5X3B3MФC, 4X4BMФC после пяти прошивок.

Согласно результатам измерений потеря массы в среднем уменьшилась на 3–4 грамма, при этом также возросло значение материалостойкости. Сокращение времени прошивки при увеличении угла подачи на стане с  $10^\circ$  до  $14^\circ$  привело к значительному увеличению износостойкости оправок несмотря на рост осевого усилия на оправку.

Важно также при подведении итогов данного этапа исследования сравнивать экономическую эффективность применения оправок из различных марок стали, в связи с тем, что конечная стоимость продукции зависит от всех затраченных на ее производство ресурсов, а применение более дорогих оправок повышает себестоимость.

Принимая во внимание стоимость изготовления оправок механической обработкой резанием одинаковой при изготовлении их из различных сталей можно определить и сравнить экономическую эффективность применения таких сталей:

$$\mathcal{E} = \frac{y}{M_3 \cdot N}, \text{ руб/т, где} \quad (1)$$

где  $y$  – условная стоимость металла для оправки, руб;  $M_3$  – масса заготовки, т;  $N$  – количество прокатанных заготовок.

Однако здесь не учитываются время на замену оправок и потеря производительности стана при замене оправок.

Исходя из стоимости материала оправок и результатов эксперимента, оправки из легированной стали 4X5MФC и 4X4BMФC показали наибольшую стойкость к износу, при этом обладая более низкой себестоимостью относительно других рассматриваемых материалов.

В итоге, после проведения всех экспериментов, можно сказать, что применение легированных инструментальных сталей целесообразно при производстве прошивных оправок в связи с набором свойств, присущих данным видам сталей. В состав легированных инструментальных сталей входят добавки молибдена, хрома, ванадия или титана, которые

улучшают механические свойства материала. Благодаря этим добавкам сталь становится более прочной и износостойкой, и ее можно рекомендовать для изготовления инструмента, подвергающегося интенсивному износу.

**В третьей главе** проанализировано с помощью программного комплекса QForm 3D влияние технологических параметров процесса прошивки на износостойкость оправок.

Операцию прошивки моделировали на заготовках диаметром 60 мм из стали 20X13 и титанового сплава BT1-0. После построения очага деформации в SolidWorks модель импортирована в программном комплексе QForm 3D.

В ходе исследования рассматривали несколько вариантов процесса прошивки заготовок с частотой вращения валков 30 и 80 об/мин, при углах подачи рабочих валков 10 и 16 ° и коэффициенте овализации равном 1,1 и 1,2. Частота вращения валков для варьируемых углов подачи и коэффициента овализации составляла 57 об/мин, а значение угла подачи для варьируемой частоты вращения валков и коэффициента овализации составляло 15°.

Расчет износа оправки диаметром 43,5 мм (рисунок 1) выполняли с применением стандартной подпрограммы QForm 3D, которая применяется для процессов горячей обработки металлов давлением.

Анализ моделирования показал неравномерный характер износа прошивной оправки. Протяжённость изношенного участка оправки в среднем составляет 100 миллиметров. Глубина износа увеличивается по мере продвижения от точки соприкосновения металла с передней частью оправки (носком) до её конического раскатного участка, после чего уменьшается к калибровочному участку оправки. Исследование включало анализ влияния таких факторов, как угол подачи  $\beta$ , частота вращения валков  $n$  и коэффициент овализации  $\xi$ , на характер и величину износа поверхности оправки. Установлено, что при прошивке заготовок величина максимального износа, вызванного нормальными напряжениями, составляет примерно 0,044 миллиметра за один проход.

В связи с этим было принято решение подробнее изучить влияние нормального напряжения на износ поверхности прошивной оправки. На рисунке 2 продемонстрировано влияние варьируемых факторов  $\beta$ ,  $\xi$ ,  $n$  на поле износа.

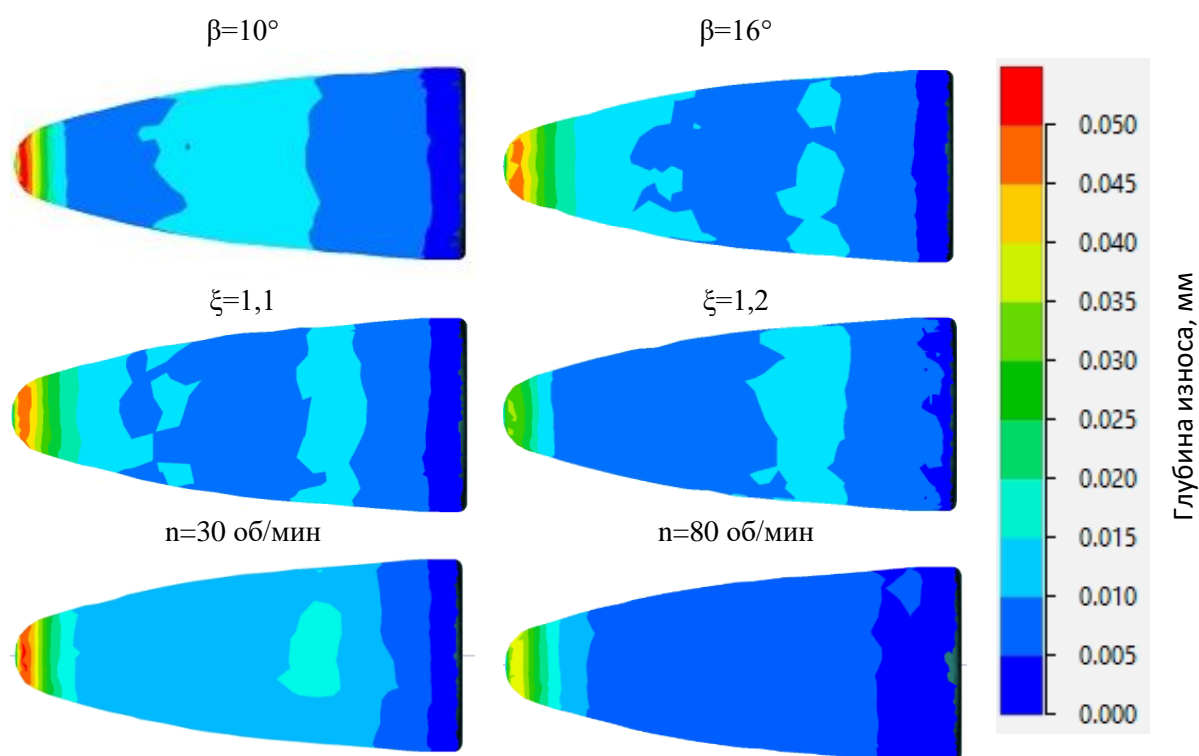


Рисунок 2 – Поле износа оправки в зависимости от варьируемых факторов

При компьютерном моделировании, как и в реальном процессе прокатки наблюдается снижение износа поверхности оправки при сокращении времени прокатки. Так при увеличении частоты вращения валков от 30 до 80 об/мин, снижается время контакта заготовки с оправкой с 3,8 до 2,4 с и износостойкость оправки возрастает на 17 %. Повышение коэффициента овализации от 1,1 до 1,2 приводит к увеличению износостойкости оправки на 27 %. Увеличение угла подачи от 10° до 16° способствует повышению износостойкости и увеличению площади контакта заготовки с прошивной оправкой, значение износа в точке максимального износа сферической части оправки уменьшается на 13 %. Поле износа показывает неравномерность степени износа на разных участках оправки в процессе эксплуатации. Максимальная глубина износа наблюдается в начале сферической части, температура которой достигает 1200 °С при этом, на торце носка оправки наблюдается минимальный износ, из-за сниженного контакта с металлом и минимального нормального давления. При увеличении угла подачи на сферической части снижается износ, а также уменьшается износ на участке перехода от сферической части к раскатной конической. При повышении частоты вращения валков наблюдается равномерное распределение износа от середины сферической части до калибрующего участка, включительно.

В работе проведен анализ зависимости износостойкости оправки от температуры ее

поверхности после операции прошивки. Для визуализации значений температуры по всей поверхности оправки было построено поле температур (рисунок 3). Время контакта заготовки с оправкой отражено в таблице 2.

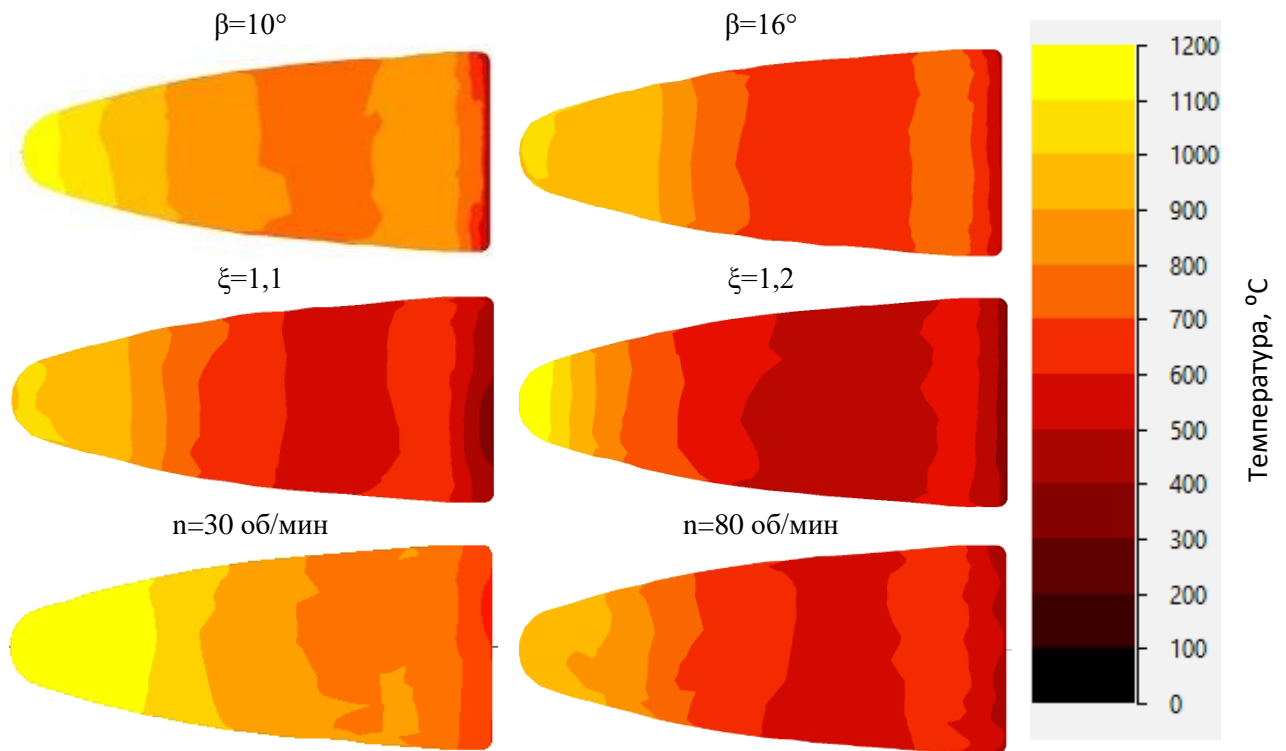


Рисунок 3 – Поле температур оправки в зависимости от варьируемых факторов

Таблица 2 – Длительность контакта оправки с прокатываемой заготовкой

	$\beta=10^\circ$	$\beta=16^\circ$	$\xi=1,1$	$\xi=1,2$	$V_b=30$ об/мин	$V_b=80$ об/мин
Время, с	4,87	3,09	3,82	2,62	6,36	2,34

Очевидно, что сокращение времени прошивки приводит к уменьшению температуры рабочего инструмента и увеличению его износостойкости.

Следует отметить, что результаты компьютерного моделирования идентичны физическому износу оправки, который составляет на наиболее нагруженном участке 0,03–0,05 мм.

В ходе исследования рассматривали несколько вариантов процесса прошивки заготовок из титанового сплава ВТ1-0 с частотой вращения валков 30, 55 и 80 об/мин, при коэффициенте овализации равном 1,1, 1,15 и 1,2 и углах подачи рабочих валков от 12° до 16°.

Анализ результатов показывает, что уменьшение времени контакта заготовки из сплава ВТ1-0 с оправкой также приводит к уменьшению износа поверхности оправки. Повышение

частоты вращения валков способствует увеличению износостойкости прошивной оправки. Глубина износа по длине прошивной оправки неравномерна, максимальный износ локализуется в начале сферической части. Увеличение угла подачи приводит к снижению износа поверхности сферической части в среднем на 0,005 мм пропорционально каждые 2°, а повышение частоты вращения валков обеспечивает более равномерное распределение износа. Уменьшение коэффициента овализации приводит к увеличению глубины износа на сферической части оправки.

**В четвертой главе** представлено экспериментальное исследование влияния параметров очага деформации на взаимодействие металла с оправкой в осевом направлении при прошивке заготовки диаметром 70 мм из стали 40Х. В ходе данного эксперимента варьировали угол подачи и диаметр оправки, все остальные параметры очага деформации были зафиксированы. Диапазон изменения угла подачи составляет от 12 до 16 градусов, а диапазон изменения диаметра оправки — от 45 мм до 52 мм.

Условия проведения эксперимента и настройка очага деформации МИСИС-130Д приведены в таблице.

Таблица 3 – Условие проведения эксперимента

Параметр	Значения
Температура нагрева заготовки	1160 °С
Частота вращения валков	57 об/мин
Расстояние между валками	60 мм
Расстояние между линейками	68 мм
Выдвижение носка оправки за пережим	60 мм

В ходе эксперимента значение осевого усилия металла на оправку фиксировали тензодатчиком, который был расположен между упорной головкой и упором. Результаты эксперимента представлены на графике (рисунок 4).

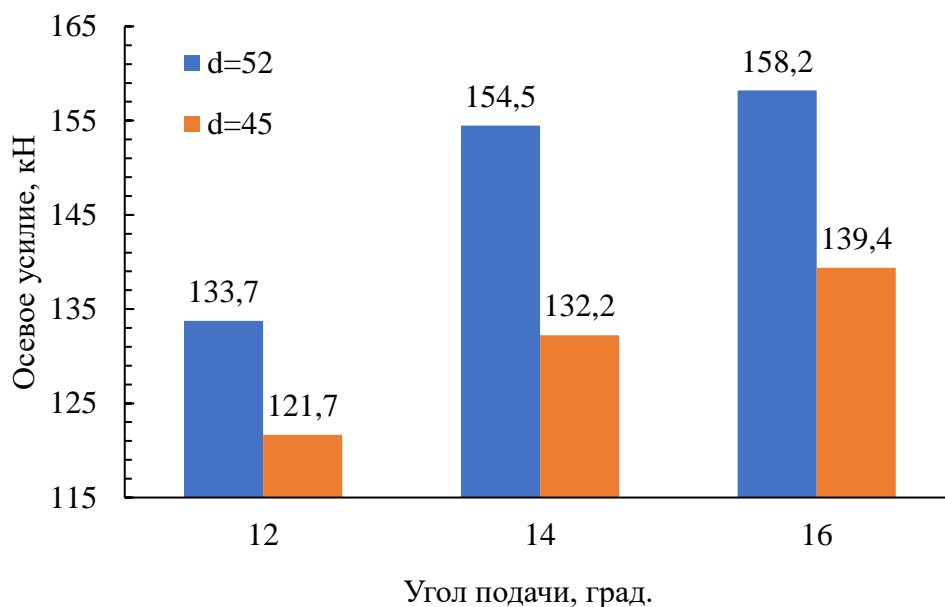


Рисунок 4 – Зависимость осевого усилия металла на оправку от угла подачи рабочих валков

Установлено, что с увеличением угла подачи осевое усилие на оправку растет, при фиксированном угле подачи уменьшение диаметра оправки с 52 до 45 мм приводит к снижению осевого усилия на 12–22 кН. Как было отмечено ранее, увеличение угла подачи приводит к снижению износа прошивных оправок, несмотря на рост осевого усилия. Повышение износостойкости объясняется тем, что при росте осевого усилия одновременно происходит уменьшение продолжительности времени прокатки, снижение количества частных обжатий в очаге деформации и сокращение длины контактной поверхности между инструментом и заготовкой.

На основе проведенных исследований разработана методика прогнозирования износа прошивных оправок, которая основана на учете:

- температурных условий работы оправок путем моделирования в программном комплексе QForm 3D;
- результатов моделирования износа прошивной оправки;
- экспериментальных данных по изменению массы оправки  $\Delta M$  в процессе прокатки;
- результатов анализа износа в зависимости от осевого усилия металла на оправку.

Для оценки изменения массы оправки в качестве основы была использована формула, предложенная Л.Г. Степанским. Так как износ прошивной оправки неравномерен было принято решение условно разделить оправку на две части, носок оправки (максимальная зона



деформации), сферическая и коническая части оправки (зона минимального износа).

$$\Delta M = N \cdot \left( \delta_1 \cdot H_1 \cdot L_1 \cdot \frac{\sigma_{s2}^2}{\sigma_{s1}^2 + \sigma_{s2}^2} + \delta_2 \cdot H_2 \cdot L_2 \cdot \frac{\sigma_{s2}^2}{\sigma_{s1M}^2 + \sigma_{s2}^2} \right), \quad (3)$$

где  $\Delta M$  – величина износа оправки, мм  $N$  – число прошитых заготовок;  $\delta$  – средняя толщина слоя разрушения адгезионной металлической связи на поверхности оправки. Значение  $\delta_2 \approx 2,5 \cdot 10^{-8}$  м для сферической и конической частей оправки, а  $\delta_1 \approx 7,5 \cdot 10^{-6}$  м для носка оправки, который в процессе прошивки разогревается до 1200 °С и фактически воспринимает значительную долю осевого усилия;  $H$  – средний путь скольжения металла под нагрузкой, м;  $L$  – текущий размер площадки скользящего контакта инструмента с обрабатываемым металлом в направлении, перпендикулярном направлению скольжения, м;  $\sigma_{s1}$ ,  $\sigma_{s1M}$  – предел текучести материала инструмента;  $\sigma_{s2}$  – предел текучести обрабатываемого материала на контактной поверхности.

Расчет текущего размера площадки скользящего контакта инструмента с обрабатываемым металлом рассчитывали по следующим формулам:

$$L_1 = 2 \cdot U \cdot \frac{\pi \cdot r_n \cdot \alpha}{180}, \quad (4)$$

$$L_2 = 2 \cdot U \cdot S_{cp} \cdot n, \quad (5)$$

где  $U$  – число оборотов оправки при прошивке одной заготовки;  $r_n$  – радиус носка оправки, м;  $\alpha$  – центральный угол между радиусами носика оправки, град.;  $S_{cp}$  – величина шага винтовой линии, м;  $n$  – количество шагов винтовой линии.

Расчет среднего пути скольжения металла под нагрузкой в соответствии с предложенными формулами:

$$H_1 = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h, \quad (6)$$

$$H_2 = 2 \cdot (L_{опр} - L_n - L_{ц}) \cdot \frac{2 \cdot r_{оправ}}{B} \cdot \frac{0,35 \cdot L \cdot p_{cp}}{P_{осев}}, \quad (7)$$

где  $L_n$  – высота носка оправки, м;  $L_{опр}$  – длина оправки, м;  $L_{ц}$  – длина цилиндрического участка, м;  $r_{оправ}$  – радиус оправки в пережиме, м;  $B$  – расстояние между валками, м;  $P_{осев}$  – осевое усилие металла на оправку, полученное расчетным или экспериментальным путем, кН;  $L$  – длина контактной поверхности металла с валком, м;  $p_{cp}$  – среднее давление металла на валок и оправку.

Предложенная формула (3) позволяет рассчитать объем и массу металла, удаляемого с контактной поверхности оправки при прошивке заготовок вследствие адгезионного разрушения и тем самым прогнозировать ее износостойкость при допустимом равномерном износе, не вызывающем нарушение стабильности процесса прокатки.

Расчеты  $\Delta M$  по предложенной методике для оправок из стали 4Х5МФС диаметром 43, 5 мм при прошивке заготовок из стали 20Х13 на стане МИСиС-130Д для первых трех

проходов показали разницу с фактическими замерами в пределах 15 %, что следует признать вполне удовлетворительными.

Ряд ведущих отраслей промышленности испытывает острую потребность в бесшовных трубах из титановых сплавов, получение которых на действующих трубопрокатных агрегатах сопряжено с технологическими и организационными проблемами, в том числе и со стойкостью технологического инструмента. В связи с этим **пятая глава** посвящена исследованию износостойкости прошивных оправок при получении труб из титановых сплавов на станах винтовой прокатки МИСиС-130Д и ТПА 70-270. Технология прокатки таких труб базируется на операциях прошивки и раскатки на короткой оправке.

Трехмерные модели очагов деформации прошивки и раскатки были построены с помощью программного комплекса SolidWorks. В качестве исходной заготовки под прошивку использовали прутки из сплава ВТ1-0 диаметром 80 мм и длиной 490 мм с зацентровкой с переднего торца. Для получения черновой трубы Ø80x8 мм была разработана калибровка оправок и линейек. Далее выполнен расчет параметров настройки прошивного стана МИСИС-130Д, которые указаны в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры настройки стана МИСиС-130Д при прошивке и раскатке труб из титановых сплавов

Параметр	Значение
Диаметр валка в пережиме, мм	430
Длина бочки валка, мм	320
Угол подачи, град	12
Частота вращения валков, об/мин	57
Материал валков	Сталь 45
Диаметр прошивной оправки, мм	50
Диаметр раскатной оправки, мм	62
Материал оправки	Сталь 4Х5МФС
Направляющий инструмент	Линейки
Материал направляющего инструмента	Сплав ХН55МБЮ
Температура нагрева заготовки перед прокаткой, °С	850
Расстояние между валками, мм	69
Расстояние между линейками, мм	76
Выдвижение носка оправки за пережим при прошивке, мм	40
Выдвижение носка оправки за пережим при раскатке, мм	41

Выбранные параметры и спроектированные трехмерные модели рабочих инструментов и заготовки позволили осуществить моделирование процесса прокатки в программном комплексе QForm 3D. Реологические и теплофизические свойства сплава ВТ1-0 выбраны из базы данных материалов программного комплекса QForm 3D. Инструмент задан как абсолютно жесткое тело, материал оправки выбран на основе предыдущих исследований – сталь 4Х5МФС.

В ходе опытной прокатки заготовки диаметром  $80,7 \pm 0,2$  мм из сплава ВТ1-0. В камерной электропечи нагревали до  $850$  °С, а гильзы – до  $830$  °С. Продолжительность нагрева заготовок перед прошивкой составила 80 мин, а гильз перед раскаткой – 30 мин.

С целью защиты заготовки от интенсивного окисления в процессе нагрева вследствие контакта металла с атмосферой печи на одну из прокатываемых заготовок перед нагревом наносили защитное покрытие на основе водного раствора огнеупорной глины и синтетического клея, после прокатки оценивали влияние нанесенного покрытия на качество получаемой поверхности труб.

В ходе эксперимента измеряли геометрические параметры гильз и труб, анализировали состояние их поверхности, а также регистрировали машинное время прокатки и силу тока на электродвигателях главного привода. По результатам моделирования для полученных гильз и труб выполнены измерения толщины стенки и наружного диаметра по десяти сечениям. На основании измерений получены значения средней толщины стенки при прошивке  $13,01 \pm 0,09$  мм, при раскатке  $8,16 \pm 0,04$  мм и наружного диаметра при прошивке  $77,05 \pm 1,16$  мм, при раскатке  $82,81 \pm 2,48$  мм. Выбранная настройка очага деформации и калибровка рабочего инструмента обеспечивают получение гильз и труб заданных размеров с высокой точностью.

Проведенные расчеты позволили исследовать момент и мощность прокатки, усилие металла на валок и осевое усилие металла на оправку. При прошивке можно выделить несколько характерных периодов. После начала первичного захвата происходит интенсивное увеличение энергосиловых параметров (ЭСП) вследствие увеличения площади контакта заготовки с валком при обжатию во входном конусе. Время первичного захвата составляет не более 0,6 с. Во время вторичного захвата усилие сначала несколько снижается, далее начинает возрастать пока не достигает установившейся стадии. Заполнение и освобождение очага деформации металлом происходит плавно, без колебаний усилия металла на валки.

При раскатке гильз на короткой оправке практически отсутствует период вторичного захвата с изменением значений нагрузок на инструмент. В данном случае можно выделить начальный период заполнения металлом очага деформации, сопровождающийся интенсивным ростом силовых параметров, далее установившийся процесс с выходом ЭСП на

«плато» и, наконец, освобождение очага деформации с резким снижением значений ЭСП. В ходе эксперимента регистрировали машинное время прокатки и силу тока электродвигателей главного привода стана.

В результате исследования установлено, что нанесение защитного покрытия на заготовку способствует снижению скольжения металла в очаге деформации, ускоряя процесс прокатки, но приводит к увеличению токовой нагрузки на 2–6 %.

В ходе каждого этапа прокатки труб фиксировали геометрические параметры (по 8 измерений на каждый параметр). Средний диаметр полученных гильз с покрытием и без покрытия составляет 80,6 мм и 80,5 мм соответственно. При этом отклонение по данным диаметрам при прошивке не превышает 1,6 %. Средний диаметр полученных труб с покрытием и без покрытия составляет 81,3 мм и 81,6 мм, соответственно. Отклонение по диаметру для трубы с покрытием составляет 0,9 %, а отклонение для трубы без покрытия составляет 1,4 %. Средняя толщина стенки полученных гильз с покрытием и без покрытия составляет 13,4 мм и 13,6 мм, соответственно, а среднее отклонение по толщине стенки при нанесении покрытия составляет 1,5 %, а без покрытия 1 %. Толщина стенки полученных труб составляет 8,5 мм и 8,4 мм при нанесенном покрытии и без покрытия, соответственно. Отклонение по толщине стенки для трубы с покрытием составляет 0,9 %, а отклонение для трубы без покрытия составляет 1,8 %.

С целью сравнения результатов моделирования и экспериментальной прокатки были выбраны полученные значения диаметров и толщины стенки для сплава ВТ1-0. При расчете экспериментальных размеров труб приняты средние значения диаметра и толщины стенки для переднего и задних концов. Результаты сравнения размеров гильз и труб представлены в таблице 5.

Таблица 5 –Сравнение результатов опытной прокатки и результатов моделирования

Параметр	Моделирование	Эксперимент	$\Delta$ , %
$D_{ср,г}$ , мм	77,05	80,55	4,34
$S_{ср,г}$ , мм	13,01	13,46	3,34
$D_{ср,т}$ , мм	82,81	82,5	0,37
$S_{ср,т}$ , мм	8,16	8,25	1,09

С учетом того, что при моделировании не учитываются некоторые факторы, разницу в результатах, полученных в ходе эксперимента и моделирования, составляющую менее 5%, можно считать допустимой.

В процессе прокатки на наружной поверхности труб зафиксированы отдельные локальные задиры глубиной около 1-1,5 мм, образовавшиеся из-за налипания металла на рабочий инструмент. На внутренней поверхности трубы были отмечены винтовые следы от оправки глубиной до 0,3 мм. Данный дефект является устранимым благодаря расточке горячекатаных труб, предусмотренной технологическим процессом. Износ оправок был незначителен, уменьшение массы оправок после каждого прохода не превышало 2-3 г.

Целью следующего этапа исследований было проведение экспериментальных прокаток на ТПА 70-270 конструкции ЭЗТМ. Предварительно было осуществлено моделирование в программном комплексе QForm 3D. Моделирование проводилось с использованием заготовки диаметром 160 мм из титанового сплава ВТ1-0 и ПТ-7М. Прошивку осуществляли с применением линейек и оправки диаметром 106 мм, после чего выполняли раскатку на короткой оправке диаметром 126 мм.

В таблице 6 приведены настройки стана для обеспечения процесса прошивки и раскатки на ТПА 70-270.

Таблица 6 – Параметры настройки стана при моделировании технологии прокатки труб из титановых сплавов на ТПА 70-270

Параметр	Значение
Диаметр валка в пережиме, мм	750
Угол подачи, град	12
Частота вращения валков, об/мин	50
Материал валков	Сталь 45
Диаметр прошивной оправки, мм	106
Диаметр раскатной оправки, мм	126
Материал оправки	Сталь 4Х5МФС
Направляющий инструмент	Линейки
Материал направляющего инструмента	Сплав ХН55МБЮ
Температура нагрева заготовки перед прокаткой, °С	860
Материал исходной заготовки	Титан ВТ1-0
Коэффициент овализации	1,1
Относительное обжатие в пережиме, %	11,9

Опытную прокатку проводили на ТПА 70-270, в состав которого входит двухвалковый прошивной/раскатной стан винтовой прокатки, оснащенный направляющими линейками. В эксперименте также как и при моделировании применяли заготовки диаметром 160 мм из сплавов ВТ1-0 и ПТ-7М, предварительно нагретые до 890 °С и 980 °С, соответственно. На поверхность каждой заготовки перед прокаткой было нанесено защитное покрытие в виде водного раствора огнеупорной глины с синтетическим клеем.

При анализе процесса моделирования прошивки и раскатки были измерены толщина стенки и наружный диаметр гильзы и черновой трубы. На основании измерений получены значения средней толщины стенки при прошивке  $26,64 \pm 0,61$  мм, при раскатке  $18,94 \pm 0,83$  мм и наружного диаметра при прошивке  $160,24 \pm 1,47$  мм, при раскатке  $166,74 \pm 1,98$  мм. Выбранная конфигурация очага деформации и калибровка рабочего инструмента обеспечивают производство черновых труб с необходимыми размерами и высокой точностью. Анализ процессов прокатки показывает, что прошивка и раскатка протекали стабильно и обеспечили получение черновой трубы заданных размеров.

Далее осуществлялась экспериментальная прокатка на ТПА 70-270. У полученных труб были измерены диаметр и толщина стенки (8 измерений на каждый параметр). Средний диаметр полученных труб из титановых сплавов ПТ-7М и ВТ1-0 составляет 166,6 мм и 165,5 мм, соответственно, отклонение не превышает 0,3 %. При производстве труб из титановых сплавов ПТ-7М и ВТ1-0 зафиксирована средняя толщина стенки 20 мм и 19,9 мм с отклонением 3 % и 2,5 % соответственно.

В процессе прокатки на поверхности труб размером 166,6 x 19,9 мм длиной 5,7 м были зафиксированы дефекты в виде небольшого количества задиров, винтовых рисок и налипших участков металла. Также на внутренней поверхности трубы наблюдается винтовой след от оправки, глубина которого не превышала 1 мм. Однако данные дефекты незначительные и легко устраняются в процессе обточки. В ходе прокатки также произошло налипание частиц металла на направляющий инструмент, с помощью напора воды под давлением до 3-4 атм налипание было устранено.

При прошивке титановых заготовок использовали оправки с внутренним охлаждением и выходом воды и пара через отверстия у носка оправки (рисунок 5). Вода и пар при прошивке способствовали разделению контактных поверхностей металла оправки и металла заготовки, уменьшая склонность к адгезии и тем самым повышая износостойкость оправок.



Рисунок 5 – Внешний вид применяемой оправки

Моделирование прокатки в программном комплексе QForm 3D с учетом ограничений демонстрирует схожие результаты с практическим экспериментом, разница по диаметру и толщине стенки гильз и труб не превышает 5 %, что считается подтверждает адекватность разработанной модели процесса.

В ходе опытной прокатки особое внимание уделяли износу прошивной и раскатной оправок, которые в процессе прошивки и раскатки охлаждали водой изнутри непрерывно, а снаружи водой в промежутках между прокатками и на воздухе. Расчеты массы износа оправок из стали 4X5МФС по предложенной методике подтвердили их высокую износостойкость, так как режимы прокатки обеспечивали машинное время при прошивке 4 с, а при раскатке – до 5 с. Условия охлаждения оправок в процессе прокатки и наличие воды и пара, выходящих из отверстий в носке оправки, по видимому, способствовали уменьшению адгезионных связей на контакте металла с инструментом при сравнительной невысокой температуре металла 850-950 °С и оправок до 930 °С.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 В ходе анализа износа оправок при прошивке заготовок из легированных сталей и титановых сплавов выявлено влияние угла подачи, коэффициента овализации и частоты вращения валков на износ прошивной оправки с применением программного комплекса QForm 3D.

2 Исходя из оценки внешнего вида оправок после процесса прошивки и анализа изменения их массы следует, что износ связан с адгезией материала инструмента с деформируемым металлом. Поэтому при выборе материала для оправок необходимо учитывать их склонность к адгезии с прокатываемым металлом, оцениваемой углеродным эквивалентом. Из исследованных марок стали наивысшую износостойкость и меньшую склонность к схватыванию коррозионностойкой стали 20Х13 с рабочей поверхностью оправок показали стали 4Х5МФС и 4Х4ВМФС, имеющие высокое значение углеродного эквивалента.

3 В ходе моделирования выявлено, что на износ оправок при прошивке заготовок из легированных сталей и титановых сплавов также влияет температура нагрева прошивной оправки и длительность машинного времени прокатки. Увеличение коэффициента овализации с 1,1 до 1,2 снижает износ прошивной оправки на 27 %, благодаря уменьшению времени контакта металла заготовки с оправкой. При увеличении угла подачи с 10 до 16 град. машинное время прокатки сокращается в 1,57 раз и снижается температура нагрева оправки и повышается ее износостойкость на 13 %.

4 Разработана методика оценки износа прошивных оправок, позволяющая прогнозировать их износостойкость, которая основана на учете:

- температурных условий работы оправок путем моделирования в программном комплексе QForm 3D;
- результатов моделирования износа прошивной оправки;
- экспериментальных данных по изменению массы оправки  $\Delta M$  в процессе прокатки;
- результатов анализа износа в зависимости от осевого усилия металла на оправку.

Разработанная методика позволяет рассчитывать износ оправок с высокой точностью, разница с фактическими замерами в пределах 15 %.

5. Результаты моделирования процесса получения труб из легированных сталей и титановых сплавов в среде программного комплекса QForm 3D коррелируются с экспериментальными результатами опытных прокаток, что позволяет использовать полученную цифровую модель и минимизировать время и затраты на разработку режимов винтовой прошивки и раскатки труб, которые обеспечивают получение гильз и труб из



легированных сталей и титановых сплавов с высокой точностью по диаметру и толщине стенки. Разработаны технологические режимы получения труб из титановых сплавов на станах МИСИС-130Д и ТПА 70-270. В ходе анализа износостойкости прошивных оправок в программном комплексе QForm 3D получено, что оправка из стали 4Х5МФС обладает наибольшей износостойкостью при сравнении с оправкой из стали 3Х3М3Ф.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ:**

- 1 **Лакиза В.А.**, Романцев Б.А., Алещенко А.С., Назаров К.И. Исследование износа оправок при прошивке заготовок на стане винтовой прокатки «МИСиС-130Д». *Металлург.* 2023, № 11, с. 124–128.
- 2 Алещенко А.С, **Лакиза В.А.**, Романцев Б.А., Король А.В. Исследование стойкости оправок при прошивке заготовок из стали 20Х13 на стане винтовой прокатки МИСиС-130Д. *Черные металлы.* 2023, № 12, с. 70-74.
- 3 **Лакиза В.А.**, Гамин Ю.В., Алещенко А.С., Король А.В. Компьютерное моделирование и экспериментальное опробование технологии прокатки труб из титанового сплава ВТ1-0. *Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов».* 2023, № 22. с. 1-9.
- 4 **Лакиза В.А.**, Гамин Ю.В., Алещенко А.С., Обыденнов Е.Н., Король А.В. Разработка технологии получения труб из сплавов на основе титана для расширения сортамента ТПА 70–270 АО «ВМЗ». *Международная научно-практическая конференция «Трубы-2023»* 13-15 сентября 2023, г. Челябинск